سال سی و سه، شمارهٔ یک، ۱٤۰۰
DOI: 10.22067/jmme.2021.71525.1020

بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال غیرهم‌جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ به فولاد کم‌آلیاژ استحکام بالای API X65*

مقاله پژوهشی

محمود شریفی تبار[۱] سحر خواجه محمودی[۲]

چکیده *در این پژوهش اتصال غیرهم‌جنس فولاد کم‌آلیاژ استحکام بالای X ٦۵ به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۲۱ بااستفاده از فرایند جوش‌کاری قوسی دستی با دو الکترود ۳۰۸ و ۳۰۹ انجام شد. در ادامه، ساختار، ریزساختار، سختی و استحکام کششی اتصالات مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ساختار هر دو اتصال در ناحیهٔ جوش حاوی فازهای آستنیت و دلتا فریت بود. بررسی‌های ریز ساختاری نشان داد که درصد فاز فریت در جوش الکترود ۳۰۹ بالاتر از مقدار این فاز در جوش الکترود ۳۰۸ بود. در هر دو اتصال یک لایهٔ واسط حاوی فازهای فریت و مارتنزیت در فصل‌مشترک فلز جوش و فولاد کم‌آلیاژ استحکام بالای X ٦۵ تشکیل شد. نتایج آزمون سختی نشان داد که مقدار سختی فلز جوش دو الکترود ۳۰۸ و ۳۰۹ به‌ترتیب ۳۰ و ۳۸ درصد بیشتر از فولاد کم‌آلیاژ بود. نتایج آزمون کشش بیانگر آن بود که استحکام کششی جوش تولیدشده با الکترود ۳۰۹ در حدود ۱/۵ درصد بالاتر از الکترود ۳۰۸ و مقدار قابلیت تغییر طول ٢٦ درصد کم‌تر بود. شکست نهایی در تمامی نمونه‌ها در فصل‌مشترک فلز جوش و فولاد کم‌آلیاژ اتفاق افتاد. بررسی سطوح شکست نمونه‌ها بیانگر ترکیب مکانیزم شکست نرم و ترد در نمونه‌های آزمون کشش بود.*

واژه‌های کلیدی فولاد زنگ‌نزن، اتصال غیر هم‌جنس، استحکام، سختی، ریزساختار.

مقدمه

انتخاب مواد مهندسی برای ساخت قطعات در صنایع مختلف به شرایط کاری و ویژگی‌های فلزات در دسترس و هم‌چنین جنبه‌های اقتصادی بستگی دارد. در برخی موارد ساخت تمامی بخش‌های یک سازه بااستفاده از فلزات دارای ویژگی‌های خاص مانند فولادهای زنگ‌نزن سبب افزایش هزینهٔ مواد اولیه می‌گردد؛ ازاین‌رو، به‌منظور صرفه‌جویی در هزینه ها، می‌توان مواضعی را که وجود فولاد زنگ‌نزن ضرورتی ندارد، با فولاد سادهٔ کربنی و یا کم‌آلیاژ جایگزین کرد. در این گونه موارد لزوم ایجاد اتصال مناسب بین آن‌ها بسیار مهم است. از آن‌جا که ترکیب شیمیایی فولادهای کم‌آلیاژ در مقایسه با فولادهای زنگ‌نزن بسیار متفاوت است، کنترل واکنش‌ها در فصل‌مشترک آن‌ها و بررسی تغییرات ساختاری و ریزساختاری در ناحیهٔ جوش و هم‌چنین تأثیر این تغییرات بر خواص اتصال از اهمیت ویژه‌ای برخوردار خواهد بود. فولاد میکروآلیاژی API 5L-X٦۵ با دارا بودن استحکام مکانیکی قابل توجه در تولید لوله‌های انتقال نفت وگاز به‌کار برده می‌شود. این فولاد دارای ریزساختار فریتی-پرلیتی است که حضور عناصر میکروآلیاژی تیتانیم، آلومینیوم، نیوبیوم و وانادیوم سبب دگرگونی آستنیت به فریت ریز دانه می‌شود [۱و۲]. از سوی دیگر، فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ جزو فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی است که حضور مقادیر اندک تیتانیم در ترکیب آن سبب مقاومت عالی دربرابر خوردگی بین دانه‌های در محدودهٔ دمایی رسوب کاربید کرم (۵۵۰ تا ۷۹۰ سانتی‌گراد) شده‌است. ازاین‌رو، اتصال غیرمشابه این دو فولاد می‌تواند راه‌حل برخی از مشکلات انتخاب مواد در صنایع مختلف نظیر نفت، گاز، پتروشیمی، نیروگاه‌های حرارتی و صنایع غذایی باشد [۱]، [3-۹].

* تاریخ دریافت مقاله ۱٤۰۰/٤/٢٦ و تاریخ پذیرش آن ۱٤۰۰/٦/۸ می‌باشد.
(۱) نویسندهٔ مسئول، دانشیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه سیستان و بلوچستان.
(۲) کارشناسی مهندسی مواد، گروه مهندسی مواد، دانشگاه سیستان و بلوچستان.
Email: msharifitabar@eng.usb.ac.ir

تاکنون درزمینهٔ اتصال غیرهم‌جنس فولادهای زنگ‌نزن ۳۲۱ و X٦٥ به سایر آلیاژهای مهندسی تحقیقاتی انجام شده‌است. به‌عنوان مثال ژانگ (Zhang) و همکاران [10-12] ریزساختار و خواص خوردگی جوش ورق‌های دولایهٔ فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۲۰۵/فولاد X٦٥ را مورد بررسی قرار دادند. هم‌چنین آن‌ها روشی ترکیبی از جوش‌کاری لیزر/ جوش‌کاری قوسی فلز- گاز محافظ خنثی (MIG) را برای جوش‌کاری این ورق‌ها پیشنهاد دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که توان حرارتی ترکیبی دو فرایند یکی از پارامترهای مؤثر بر اندازهٔ دانه و توزیع عناصر آلیاژی در فازهای فریت و آستنیت است [12]. سایرام (Sayiram) و آریواژاگان (Arivazhagan) [13] تغییرات ریزساختاری در ناحیهٔ اتصال غیرهم‌جنس آلیاژ اینکونل ۸۰۰ و فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ را مورد بررسی قرار دادند. دو فلز پرکننده از جنس آلیاژ اینکونل ۸۲ و اینکونل ٦۱۷ برای اتصال این قطعات به‌روش جوش‌کاری قوسی با الکترود تنگستنی و گاز محافظ (GTAW) استفاده شد. نتایج بررسی‌های ریزساختاری نشان داد که تغییر در نوع فلز پرکننده تأثیر قابل توجهی بر نوع فازهای تشکیل‌شده در ناحیهٔ جوش و نحوهٔ توزیع عناصر آلیاژی دارد. درنهایت فلز پر-کننده اینکونل ٦۱۷ به‌عنوان فلز مناسب برای این اتصال غیرمشابه پیشنهاد شد. در تحقیق دیگری شارما (Sharma) و همکارانش [14] تأثیر ترکیب شیمیایی فلز پرکننده بر خواص اتصال غیرهم‌جنس ایجادشده بین آلیاژ پایه نیکل C-276 و فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ را به‌روش جوش‌کاری قوسی با الکترود تنگستنی و گاز محافظ (GTAW) مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق تأثیر تغییر ریزساختار بر خواص مکانیکی و خوردگی ناحیهٔ جوش مورد بررسی قرار گرفت. سه فلز پر-کنندهٔ متفاوت از جنس آلیاژهای پایه نیکل و یک فلز پرکننده از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳٤۷ انتخاب شد. نتایج بررسی‌های آن‌ها نیز نشان داد که تغییر ترکیب شیمیایی فلز پرکننده می-تواند تأثیر قابل‌توجهی بر خواص ناحیهٔ اتصال داشته باشد. درنهایت فلز پرکننده ER-NiCrMo-4 به‌عنوان فلز پرکنندهٔ مناسب برای اتصال این فلزات غیرمشابه پیشنهاد گردید.

نتایج بررسی‌های پیشین نشان می‌دهد که انتخاب نوع فلز پرکننده برای اتصال غیرمشابه فلزات به جنس فلز پایه وابسته است و در هر مورد باید فلز پرکنندهٔ مناسب انتخاب شود. از آن جا که تاکنون در منابع تحقیقاتی داخلی و خارجی قابل دسترس، مطالعهٔ عمیق و علمی درخصوص اتصال غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ و فولاد X65 به‌روش جوش‌کاری الکترود دستی به‌عنوان یکی از روش‌های ارزان و در دسترس اتصال مواد انجام نشده‌است، ازاین‌رو هدف از این تحقیق بررسی تأثیر نوع فلز پرکننده بر ریز ساختار و خواص مکانیکی این اتصال غیرمشابه است. بدین منظور، الکترود های فولاد زنگ‌نزن ۳۰۸ و ۳۰۹ به‌عنوان دو فلز پرکنندهٔ رایج اتصال فولادهای زنگ‌نزن به فولاد کربنی برای برقراری اتصال انتخاب شدند. سپس، ساختار، ریزساختار و خواص مکانیکی اتصالات ایجادشده مورد بررسی قرار گرفت تا الکترود مناسب از بین این دو گزینه برای اتصال فولادهای مذکور انتخاب شود. .

مواد و روش تحقیق

به‌منظور اتصال فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۲۱ به فولاد کم‌آلیاژ استحکام بالای X٦٥، ورق‌هایی با ابعاد ۳۰۰×۱۰۰×۱۲ میلی-متر مکعب از هر آلیاژ تهیه شد. ترکیب شیمیایی این روق‌ها که توسط آنالیز طیف‌سنج نشر اتمی اندازه‌گیری شد، در جدول (۱) ارائه شده‌است. پیش از انجام فرایند جوش‌کاری تمامی سطوح ورق‌های مذکور به‌منظور حذف آلودگی‌های سطحی و اکسیدها به‌طور کامل سنگ زده شد و درنهایت توسط استون شستشو داده شد.

جوش‌کاری قطعات بااستفاده از روش جوش‌کاری قوسی دستی انجام شد. بدین منظور از دو نوع الکترود جوش‌کاری با کدهای E308H و E309L ساخت شرکت الکترودسازی یزد و قطر ٤ میلی‌متر استفاده شد. این دو الکترود به‌عنوان فلز پرکنندهٔ رایج برای اتصال فولادهای زنگ‌نزن به فولادهای کربنی مورد استفاده قرار می‌گیرند. جدول (۲) ترکیب شیمیایی فلز جوش خالص حاصل از این الکترودها را که توسط شرکت سازنده ارائه شده‌است نشان می‌دهد [15].

جدول ۱ ترکیب شیمیایی مواد اولیه

	ترکیب شیمیایی (درصد وزنی)									
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Ti	V	Nb	Fe
فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱	۰/۰۳	۰/٤۱	۱/۱۳	۱۷/۲۰	۰/۲۸	۹/٦۸	۰/۳۲	۰/۱۰	۰/۰۲	مابقی
فولاد X٦٥	۰/۱۰	۰/۲۰	۱/۲۰	۰/۰۸	۰/۰۱	۰/۰٤	۰/۰۱	۰/۰٦	۰/۰۲	مابقی

جدول ۲ ترکیب شیمیایی الکترودهای جوش‌کاری (گزارش‌شده توسط شرکت الکترودسازی یزد) [15]

	ترکیب شیمیایی (درصد وزنی)									
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Mo	Cu	Nb	Fe
الکترود E308H	۰/۰۷	۰/٥	۱/٥	۱۹/۰	۰/۰٥	۱۰/۰	<۰/٥	<۰/٥	۰/۰۱	مابقی
الکترود E309L	<۰/۰۳	۰/۷	۰/۹	۲٤/۰	۰/۰۸	۱۳/۰	<۰/۳	<۰/۳	۰/۰۲	مابقی

براســاس طراحی انجام‌شــده، جوش‌کاری بااســتفاده از طراحی اتصال جناقی دوطرفه انجام شد. در مجموع از چهار پاس برای پرکردن درز اتصال استفاده شد. دمای بین پاسی نیز در حدود ۱۵۰ درجهٔ سلسیوس انتخاب شد. هم‌چنین، برای هر دو نوع الکترود، محدودهٔ جریان جوش‌کاری و نوع قطبیت براساس پیشنهاد سازنده مطابق جدول (۳) انتخاب شد.

جدول ۳ مشخصات فرایند جوش‌کاری مورداستفاده برای اتصال فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ به فولاد X٦٥

متغیر جوش‌کاری	الکترود ۳۰۸	الکترود ۳۰۹
جریان جوش‌کاری (آمپر)	۱۳٥	۱٤٥
ولتاژ جوش‌کاری (ولت)	۲٦	۳۰
سرعت جوش‌کاری (سانتی‌متر بر دقیقه)	۱٦-۱۷	۱٦-۱۷
قطر الکترود (میلی‌متر)	٤	٤
نوع قطبیت	DC^+	DC^+

به‌منظور شناسایی نوع فازهای تشکیل شده در ناحیهٔ جوش، آنالیز پراش اشــعهٔ ایکس با طول موج تک‌رنگ مس (۱/٥٤۱۸۷٤ انگســتروم)، اندازهٔ فاصــلهٔ روبش (Scan step size) ۰/۰۲ درجه و زمان روبش ۱ ثانیه در هر فاصــله (Scan step time) در محدودهٔ زاویهٔ ۲۰ تا ۸۰ درجه انجام شد. بدین منظور نمونه‌های مدنظر به‌طور کامل از فلز جوش استخراج شد. ترکیب شیمیایی فلز جوش توسط دستگاه کوانتومتری PMI MASTER SMART اندازه‌گیری شـــد. برای بررســـی ریزســـاختار ناحیهٔ جوش و منطقهٔ متأثر از حرارت، نمونه‌های مختلف از نواحی متفاوت ســـطح مقطع جوش تهیه شد و پس از آماده‌سازی اولیه توسط سنباده‌های ۱۸۰ تا ۱٥۰۰ بااســـتفاده از نمد و ذرات آلومینا با اندازهٔ ٥۰ نانومتر پولیش‌کاری شـــدند. به‌دلیل مقاومت به خوردگی متفاوت فولاد زنگ‌نزن با فولاد کم‌آلیاژ اســتحکام بالا، از دو نوع محلول حکاکی متفاوت برای آشکار سازی ریز ساختار استفاده شد. نایتال (Nital) ۳ درصد (۳ درصد اسید نیتریک و ۹۷ درصـــد متانول) به‌عنوان محلول حکاکی پایه برای آشـــکارســـازی ریزســـاختار فولاد X٦٥ و محلول کالینگ (Kalling's reagent) (۳۳ میلی‌لیتر آب، ۱/٥ گرم $CuCl_2$، ۳۳ میلی‌لیتر متانول و ۳۳ میلی‌لیتر HCl) برای آشکار سازی ریز ساختار و فازهای موجود در فلز جوش و منطقهٔ متأثر از حرارت فولاد زنگ‌نزن مورد اســـتفاده قرار گرفت. در ادامه، ریز ساختار نواحی مختلف بااستفاده از میکرو سکوپ نوری ساخت شرکت Olympus و میکروسکوپ الکترونی روبشی نشـــر میـدانی TESCAN MIRA3 FESEM مجهز بـــه

آشکارساز طیف‌سنجی انرژی (EDS) SAMX، برای اندازه‌گیری ترکیب شیمیایی فازها، مطالعه شد. به‌منظور بررسی خواص مکانیکی اتصالات از دو آزمون کشش و سختی سنجی استفاده شد. آزمون کشش برروی نمونه‌های عرضی توسط دستگاه آزمون کشش Universal شرکت کوپا (Koopa) با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. نمونه‌های آزمون به‌صورت عمود بر درز اتصال و به‌نحوی که فلز جوش در مرکز نمونه قرار داشت، آماده‌سازی شد. برای هر اتصال سه نمونه مورد آزمون قرار گرفت. هم‌چنین، برای تعیین مکانیزم شکست، سطح شکست نمونه‌های آزمون کشش توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM KYKY EM2900) بررسی شد. مقدار سختی نقاط مختلف جوش نیز بااستفاده از دستگاه سختی‌سنج ویکرز با بار اعمالی ۵۰۰ گرم برای مدت زمان ۱۰ ثانیه اندازه‌گیری شد و منحنی تغییرات سختی بر حسب فاصله از سمت فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ تا فولاد X٦٥ برای هر اتصال رسم شد.

نتایج و بحث

ترکیب شیمیایی فلز جوش

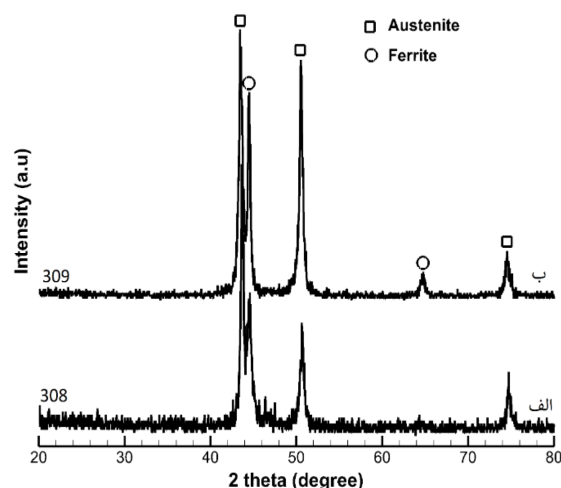
در روش جوش‌کاری قوسی دستی ذوب شدن هم‌زمان الکترود و فلز پایه و اختلاط این دو مذاب سبب تغییر ترکیب شیمیایی فلز جوش حاصل از الکترود می‌شود. درصد حضور فلز پایه در فلز مذاب توسط متغیری به‌نام درصد رقت (Dilution) سنجیده می‌شود. هرچه درصد رقت بیشتر باشد میزان مذاب حاصل از فلز پایه در ترکیب مذاب کل بیشتر است. رقت سبب می‌شود تا ترکیب فلز مذاب تغییر کند و ازاین‌رو سبب ایجاد ریز ساختارهای متفاوت در فلز جوش خواهد شد. به‌منظور بررسی دقیق‌تر ترکیب شیمیایی فلز جوش پس از جوش‌کاری از آنالیز کوانتومتری استفاده شد که نتایج آن در جدول (٤) ارائه شده‌است. همان‌گونه که مشاهده می شود در صد عناصر آلیاژی کرم و نیکل در فلز جوش حاصل از الکترود ۳۰۹ بیشتر از فلز جوش الکترود ۳۰۸ است. نکتهٔ دیگر آن است که مقدار عنصر نیکل از ۱۰ درصد وزنی در ترکیب الکترود ۳۰۸ به ۹/۳ درصد در فلز جوش کاهش یافته‌است. درخصوص الکترود ۳۰۹ نیز در صد نیکل از ۱۳ در صد وزنی در ترکیب الکترود به ۱۲/۷ درصد وزنی در فلز جوش کاهش یافت. اگر درصد بازیابی نیکل به‌عنوان یک فلز نجیب حدود ۱۰۰ در صد در نظر گرفته شود، ملاحظه می شود که میزان کاهش درصد نیکل در هر دو جوش کم‌تر از ۱۰ درصد است. واضح است که درصد نیکل در فولاد کم آلیاژ استحکام بالا کم‌تر از ۰/۱ در صد است. بنابر این می‌توان نتیجه گرفت که میزان رقت در هر دو اتصال در مرکز حوضچهٔ مذاب اندک و ناچیز است.

جدول ٤ نتایج آنالیز کوانتومتری ترکیب شیمیایی فلز جوش حاصل از الکترودهای ۳۰۸ و ۳۰۹

	ترکیب شیمیایی (درصد وزنی)									
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Ti	V	Nb	Fe
الکترود ۳۰۸	۰/۰٦	۰/۲۱	۱/٥٦	۱۸/۸٤	۰/۰٥	۹/۳	۰/۰۲	۰/۱٥	۰/۰۱	مابقی
الکترود ۳۰۹	۰/۰۳	۰/۳٦	۰/۸٥	۲۳/۳	۰/۰۸	۱۲/۷۰	۰/۰۱	۰/۰٦	۰/۰۲	مابقی

بررسی ریزساختار و فازهای تشکیل‌شده در فلز جوش

شکل (۱) الگوی پراش اشعهٔ ایکس فلز جوش حاصل از دو الکترود ۳۰۹ و ۳۰۸ در اتصـال غیرمشـابه فولاد زنگ‌نزن آ ستنیتی ۳۲۱ به فولاد کم‌آلیاژ ا ستحکام بالای X۶۵ را نشان می‌دهد.



شکل ۱ الگوی پراش اشعهٔ ایکس فلز جوش حاصل از دو الکترود، (الف) ۳۰۸ و (ب) ۳۰۹ پس از اتصال غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۲۱ به فولاد کم‌آلیاژ استحکام بالای X۶۵

ساختار جوش حاصل از هر دو الکترود شامل فازهای آ ستنیت (شمارهٔ کارت ۰۲۹۷-۰۳-۰۰) و دلتا فریت (شمارهٔ کارت ۰۳۹۶-۰۳۴-۰۰) اسـت. نکتهٔ قابل‌توجه آن اسـت که شـــدت پیک‌های مشـــخصـــهٔ فاز دلتا فریت در فلز جوش الکترود ۳۰۹ در مقایسه با الکترود ۳۰۸ بالاتر است. از آن‌جا که شدت پیک مشخصهٔ فازها در آنالیز پراش ا شعهٔ ایکس متناسب با مقدار فاز است، ازاین‌رو می‌توان نتیجه گرفت که در صد فاز دلتا فریت در فلز جوش الکترود ۳۰۹ در مقایسه با الکترود ۳۰۸ بالاتر خواهد بود.

شـــکل (۲- الف) و (۲- ب) به‌ترتیب تصـــاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی فلز جوش الکترودهای ۳۰۸ و ۳۰۹ در پاس آخر را نشـان می‌دهد. در شـکل (۲- الف) تصویر یک فاز تیره با دو مورفولوژی کرمی شکل و لایه‌ای در درون زمینه قابل‌تشخیص ا ست؛ اما، مورفولوژی این فاز در شـــکل (۲- ب) از نوع اســـکلتی اســـت. هم‌چنین میزان پیوســتگی این فاز در فلز جوش الکترود ۳۰۹ بســیار بیشــتر است.

در جوش‌های چند پا سه، حرارت حا صل از یک پاس جوش‌کاری می‌تواند ســبب بازگرمایش پاس‌های زیرین و تغییر ریزســاختار آن‌ها گردد. شــکل‌های (۲- ج) و (۲- د) به‌ترتیب تصــاویر میکروســکوپی ناحیهٔ بازگرمایش ســاختار جوش الکترودهای ۳۰۸ و ۳۰۹ را نشان می‌دهد. درخصوص الکترود ۳۰۸، همان‌گونه که در شـــکل (۲- ج) ملاحظه می شود، در اثر بازگرمایش در صد فاز ثانویه کاهش می‌یابد و مورفولوژی آن در برخی از نقاط از کرمی‌شــکل به کروی تغییر کرده‌است. در سوی مقابل شکل (۲- د) نشان می‌دهد که حرارت ســـبب کاهش پیوســـتگی فاز ثانویه در ناحیهٔ بازگرمایش جوش الکترود ۳۰۹ شده‌است.

به‌منظور بررســـی دقیق‌تر این فازها، ترکیب شـــیمیایی آن‌ها باا ستفاده از آنالیز طیف‌سنج انرژی به صورت نیمه‌کمی تعیین شـــد. با مقایســـهٔ نتایج آنالیز شـــیمیایی نیمه‌کمی در جدول (۵) مشاهده می‌شود که درصد کرم و مولیبدن در فاز کرمی شکل (نقطهٔ A) و ا سکلتی (نقطهٔ C) در مقایسه با فاز زمینه به‌میزان قابل‌توجهی افزایش یافته و درصـد نیکل کم‌تر شده‌است.

جدول ۵ ترکیب شیمیایی فازهای نشان داده‌شده در شکل ۲

مکان آنالیز	کرم	نیکل	مولیبدن	سیلسیم	آهن
نقطهٔ A	۲۴/۷	۳/۲	۳/۳	۰/۹	مابقی
نقطهٔ B	۱۹/۳	۸/۱	۱/۲	۰/۴	مابقی
نقطهٔ C	۲۹/۳	۷/۹	۰/۷	۰/۳	مابقی
نقطهٔ D	۲۲/۷	۱۳/۶	۰/۹	۰/۸	مابقی

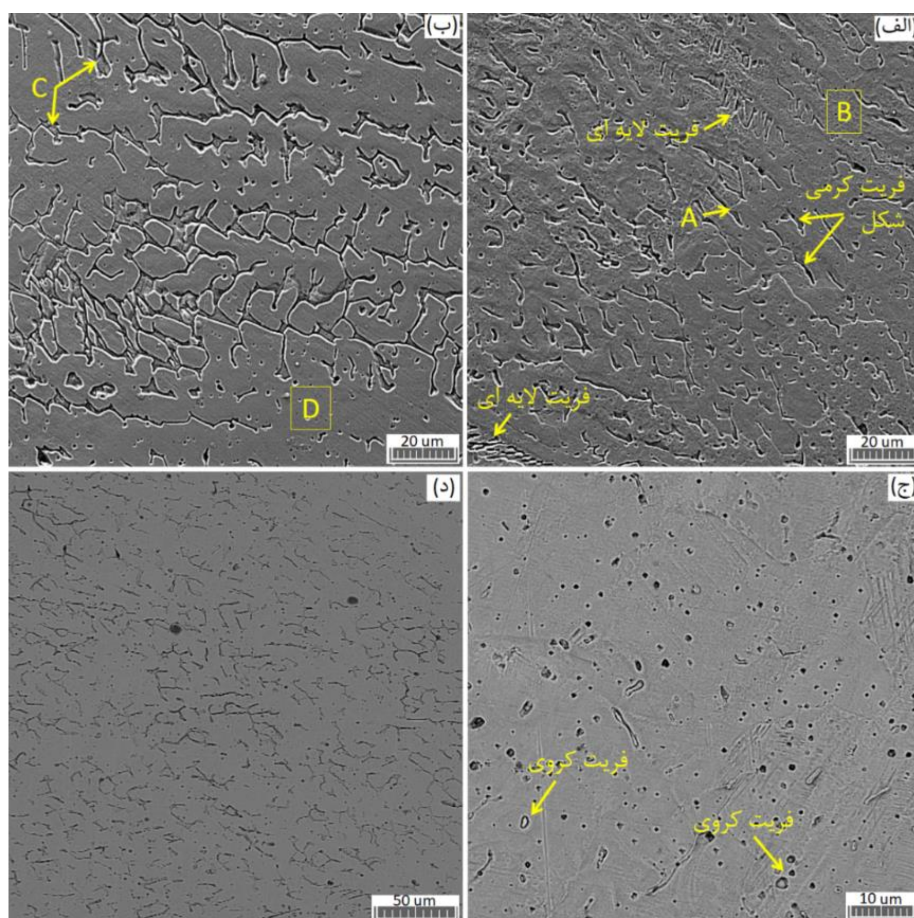
در ســاختار فولادهای زنگ‌نزن کرم و مولیبدن عناصــر پایدارکنندهٔ فاز فریت و نیکل عنصر پایدارکنندهٔ فاز آ ستنیت اســت [16]. به‌عبارت دیگر، عنصـر کرم و مولیبدن تمایل به رســـوب در فاز فریت را دارند. ازاین‌رو با در نظر گرفتن نتایج آنالیز پراش اشــعهٔ ایکس در شــکل (۲) و نتایج آنالیز

شـــیمیایی می‌توان نتیجه گرفت که ســـاختار ناحیهٔ جوش ایجاد شده تو سط هر دو فلز پرکنندهٔ ۳۰۸ و ۳۰۹ حاوی فاز دلتا فریت توزیع‌شــده درزمینهٔ آســتنیتی اســت. با بررســی دقیق‌تر تصاویر میکرو سکوپی ساختار این نمونه‌ها می‌توان دریافت که درصـــد فاز دلتا فریت در ســـاختار فلز جوش الکترود ۳۰۹ بالاتر اســـت. اندازه‌گیری درصـــد فازها در تصاویر متالوگرافی باا ستفاده از نرم‌افزار Image J نشان داد که درصـد فاز فریت در سـاختار جوش الکترودهای ۳۰۸ و ۳۰۹ به‌ترتیب برابر با ٦/٥ و ۱۳/٥ درصـــد می‌باشـــد که این نتایج با شدت نسبی پیک‌های مشخصهٔ فاز دلتا فریت در الگوی پراش اشعهٔ ایکس مطابقت دارد.

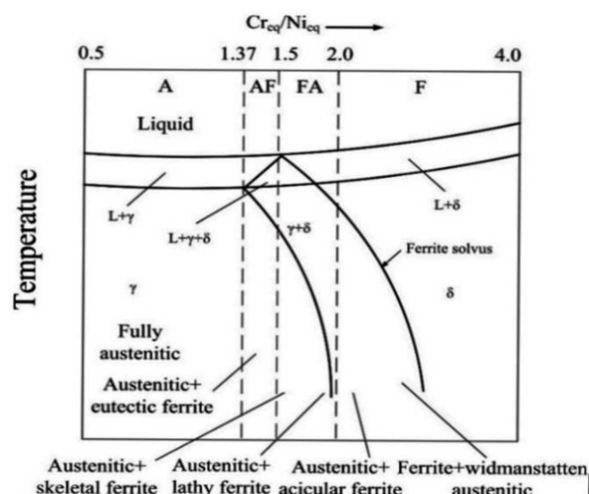
در هنگام جوش‌کاری فولادهای زنگ‌نزن، تشکیل ترک انجمادی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مشـــکلات فرایندی این فولادها مطرح می‌باشد. امروزه به‌طورکلی پذیرفته شده‌است که برای جلوگیری از ترک‌خوردگی انجمادی، ســـاختار فلز جوش فولادهای زنگ‌نزن باید حاوی مقداری (٥ تا ۱۰ درصد) فاز دلتا فریت باشد. درصد فاز دلتا فریت و هم‌چنین شـــکل آن به‌میزان کرم معادل (Cr_{eq}) و نیکل معادل (Ni_{eq}) فولاد و پارامتری تحت عنوان نســـبت کرم معادل به نیکل معادل (Cr_{eq}/Ni_{eq}) بســـتگی دارد. مقدار کرم معادل و نیکل معادل را می‌توان بااستفاده از روابط زیر محاسبه کرد [16]:

$$[\mathrm{Cr}]_{\mathrm{eq}}\% = \mathrm{W_{Cr}}\% + \mathrm{W_{Mo}}\% + 1.5\mathrm{W_{Si}}\% + 0.5\mathrm{W_{Nb}}\% + 2\mathrm{W_{Ti}}\% \quad (۱)$$

$$[\mathrm{Ni}]_{\mathrm{eq}}\% = \mathrm{W_{Ni}}\% + 0.5\mathrm{W_{Mn}}\% + 30\mathrm{W_{C}}\% \quad (۲)$$



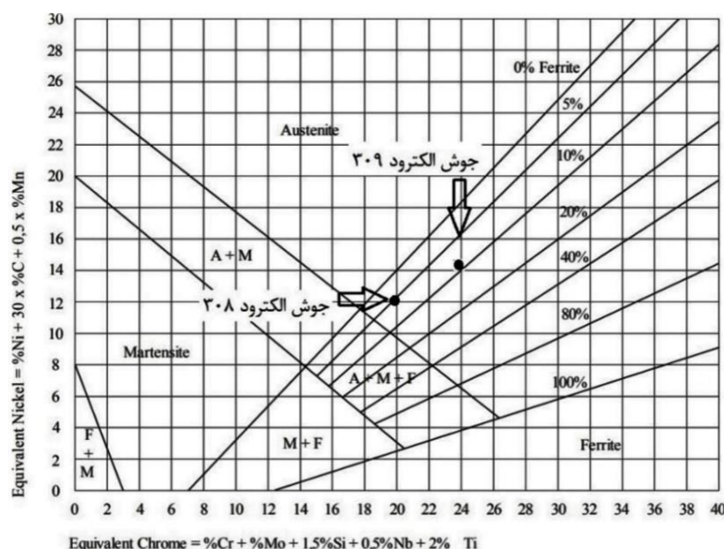
شکل ۲ اشکال مختلف فاز فریت در (الف) ریزساختار پاس آخر در الکترود ۳۰۸، (ب) ریزساختار پاس آخر در الکترود ۳۰۹، (ج) ریزساختار ناحیهٔ بازگرمایش فلز جوش الکترود ۳۰۸، (د) ریزساختار ناحیهٔ بازگرمایش فلز جوش الکترود ۳۰۹



شکل ۳ وابستگی نحوهٔ انجماد مذاب فولادهای زنگ‌نزن به ترکیب شیمیایی [17]

شـــکل (۳) وابســـتگی نحوهٔ انجماد جوش فولادهای زنگ‌نزن را به مقدار Cr_{eq}/Ni_{eq} درشـرایط تعادلی به‌صـورت طرح‌واره نشــــان می‌دهد. انجماد اولیه درحین جوش‌کاری می‌تواند با ایجاد فاز فریت و یا آستنیت آغاز شود. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، در مقادیر Cr_{eq}/Ni_{eq} پایین، شــروع انجماد با تشــکیل فاز آســتنیت خواهد بود، اما در نســبت‌های بالای Cr_{eq}/Ni_{eq} نحهٔ انجماد تغییر می‌کند و با تشکیل فاز فریت آغاز خواهد شد. البته باید به این نکته نیز توجه داشــت که در مقدار Cr_{eq}/Ni_{eq} ثابت، افزایش درصــد آهن ســبب باریک‌شـــدن منطقهٔ دوفازی فریت+ آســتنیت می‌شـــود و می‌تواند بر میزان و مورفولوژی فریت تأثیرگذار باشـــد [17]. مقدار کرم معادل و نیکل معادل برای جوش حاصـــل از الکترود ۳۰۸ به‌ترتیب برابر ۱۹/۲۳ و ۱۱/۸۷ درصـــد وزنی و برای الکترود ۳۰۹ برابر با ۲۳/۹۵ و ۱٤/۰۲ درصـــد وزنی محاســـبه شـــد. با در نظر گرفتن مقادیر محا سبه شده، ن سبت Cr_{eq}/Ni_{eq} برای فلز جوش حا صل از الکترود ۳۰۸ و ۳۰۹ به‌ترتیب برابر با ۱/٦۲ و ۱/۷۰ خواهد بود. مقادیر محاسبه‌شده بیانگر آن است که انجماد مذاب هر دو الکترود با فریت آغاز شده ا ست. در ادامه سرد شدن و کاهش دما آلیاژ منجمدشـــده وارد ناحیهٔ دوفازی فریت و آ ستنیت شده ا ست. چنان‌چه سرعت سرد شدن به صورت تعادلی و آهســـته باشـــد، با ادامهٔ کاهش دما فاز فریت به آ ستنیت تبدیل می شود، اما در فرایندهایی مانند جوش‌کاری که سـرعت سـردشـدن غیرتعادلی اسـت دگرگونی فریت به آ ستنیت کامل نمی شود و ازاین‌رو مقداری فاز دلتا فریت در سـاختار جوش باقی خواهد ماند. نکتهٔ دیگری که در شـکل (۳) ن شان داده شده ا ست، واب ستگی ظاهر فریت به ن سبت Cr_{eq}/Ni_{eq} است. ازآن‌جاکه این نسبت برای هر دو فلز مذاب حا صل از الکترودهای ۳۰۸ و ۳۰۹ نزدیک به هم و بین ۱/۵ و ۲ قرار داشـــت، انتظار می‌رفت که فاز فریت باقی‌مانده در سـاختار دارای مورفولوژی اسـکلتی (کرمی‌شـکل) و لایه‌ای باشـــد که با نتایج تجربی هم‌خوانی داشـــت. هم‌چنین، بازگرمایش جوش چندپاســـه ســـبب انحلال جزیی فریت، ت شکیل موفولوژی فریت کروی و کاهش پیو ستگی این فاز شد.

م قدار فاز دل تا فر یت موجود در ســــاخ تار جوش فولاد های ز نگ‌نزن آســـتنیتی را می‌توان با در نظر گرفتن مقادیر کرم معادل و نیکل معادل بااسـتفاده از نمودار شـافلر (Schaeffler diagram) تخمین زد [17]. شـکل (٤) نمودار شـــافلر را نشـــان می‌دهد. ترکیب فلز جوش حاصـــل از دو الکترود ۳۰۸ و ۳۰۹ روی این نمودار ن شان داده شده ا ست. همان‌گونه که ملاحظه می‌شـــود مقدار فریت در فلز جوش الکترود ۳۰۸ در حدود ٦ درصد و در الکترود ۳۰۹ در حدود ۹ درصـد تخمین زده می‌شـود. با جمع‌بندی نتایج بیان‌شـده می‌توان دریافت که مقدار فاز دلتا فریت در ســـاختار جوش هر دو الکترود ۳۰۸ و ۳۰۹ به‌میزان لازم برای جلوگیری از ایجاد ترک انجمادی می‌باشد.



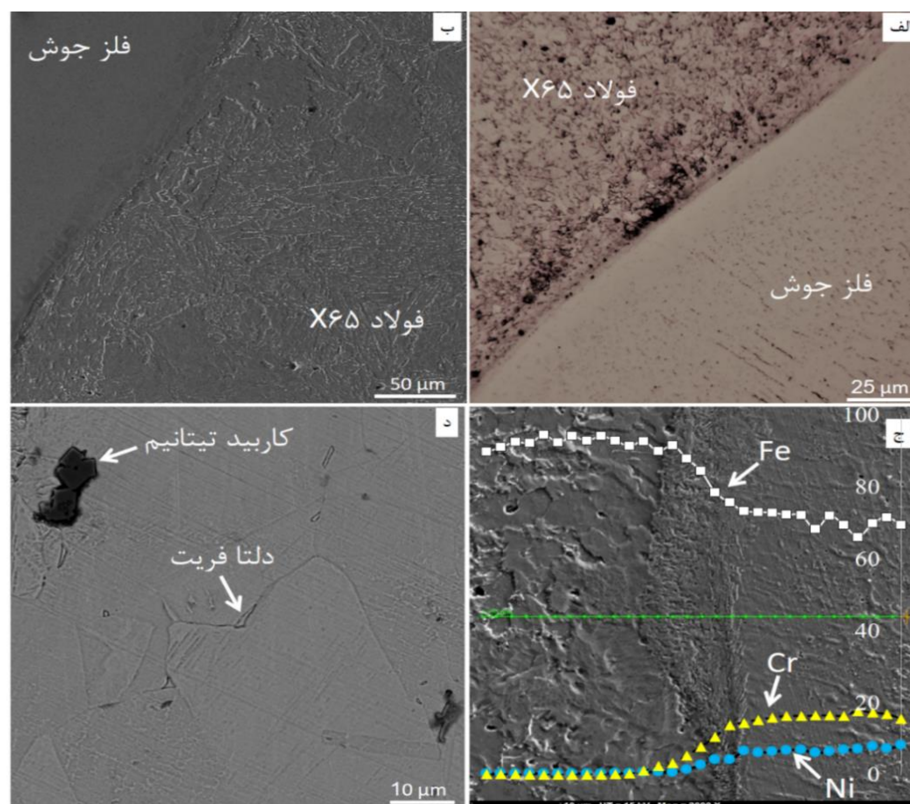
شکل ٤ نمودار شافلر [17]

ریزساختار فصل مشترک فلز جوش و ناحیهٔ متأثر از حرارت

الکترود ۳۰۸. تصـویر میکروسـکوپی نوری ناحیهٔ متأثر از حرارت فولاد X٦٥ جوش کاری‌شـده با الکترود ۳۰۸ در شکل (۵- الف) نشان داده شده‌است. مرز ذوب یک‌نواخت و عاری از عیب اسـت. تصـویر میکروسـکوپی الکترونی روبشـی مرز ذوب و ناحیهٔ متأثر از حرارت در پاس آخر و ناحیهٔ بازگرمایش به‌ترتیب در شکل‌های (۵- ب) و (۵- ج) نشان داده شده‌است.

شـایان ذکر اسـت که در پاس نهایی، فصـل مشـترک ناحیهٔ ذوب و فلز پایه به صورت واضح قابل تفکیک است؛ اما در ناحیهٔ بازگرمایش، همان‌طور که در شـکل (۵- ج) نشان داده شده‌است، گرمایش مجدد منجر به تشکیل یک لایهٔ واسط بین فلز پایه و حوضچهٔ مذاب شده‌است. به‌منظور شناسایی فازهای تشکیل شده در فصل‌مشترک، تغییرات غلظت عناصـر آهن، کرم و نیکل در عرض فصـل‌مشـترک جوش و فولاد X٦٥ به صورت خطی اندازه‌گیری شد. نتایج این اندازه‌گیری در شکل (۵- ج) به‌صورت منحنی تغییرات غلظت عناصـر (درصـد وزنی) برحسـب فاصـله رسـم شـده‌اسـت. فولاد X٦٥ غنی از آهن و فلز جوش علاوه‌بر آهن، حاوی عناصـر نیکل (حدود ۸ درصـد وزنی) و کرم (حدود ۱۸ درصـد وزنی) اسـت. اما، غلظت این عناصـر در فصـل‌مشـترک فلز جوش و فولاد X٦٥ متفاوت اسـت و از سـمت فولاد X٦٥ به‌سـمت فلز جوش در عرض فصـل مشترک به صورت تدریجی افزایش یافته‌است. در مرکز این لایهٔ واسط غلظت عناصر آهن، کرم و نیکل به‌ترتیب برابر با ۸٤/۵، ۷/٦ و ۲/۹ در صد وزنی است. باتوجه به در صد این عناصـر و محاسـبهٔ کرم معادل و نیکل معادل، نوع فازهای موجود در فصل‌مشترک بااستفاده از نمودار شافلر ترکیبی از فریت و مارتنزیت تعیین شـد. این نتایج نشـان می‌دهد که اتصـال فلز جوش فولاد ۳۰۸ با فولاد X٦٥ توسـط یک لایهٔ واسط حاوی فازهای فریت و مارتنزیت برقرار شده‌است.

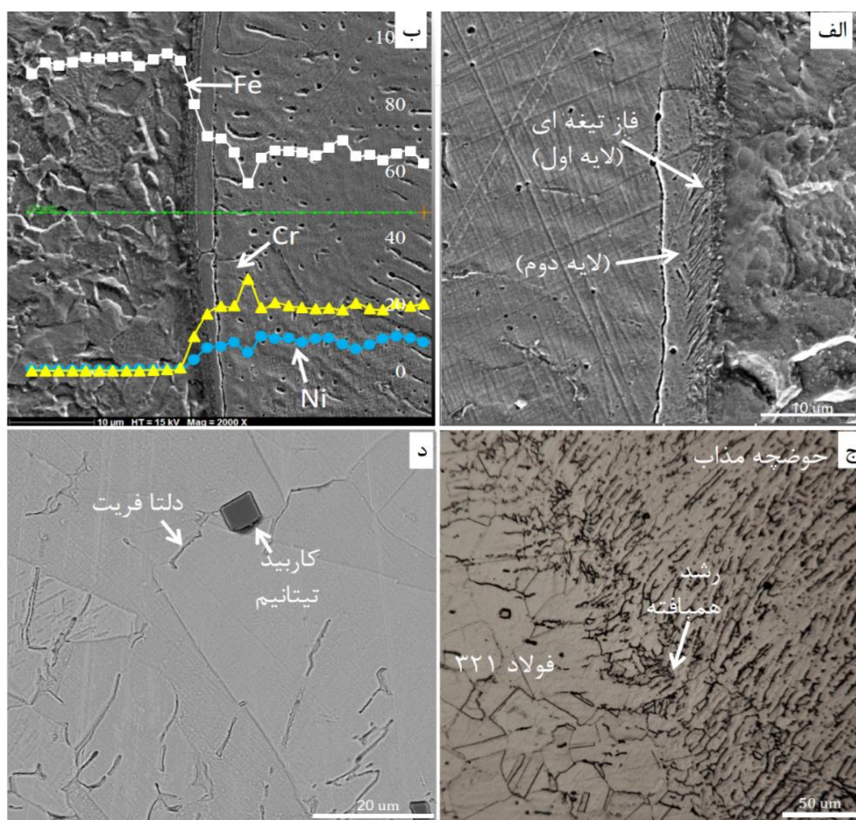
تصویر میکرو سکوپی الکترونی روبشی ناحیهٔ متأثر از حرارت فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱ شـکل (۵- د) نشـان‌دهندهٔ حضـور ذرات تیره‌رنگ با مورفولوژی مکعبی و فاز دلتا فریت در ناحیهٔ متأثر از حرارت است. نتایج آنالیز طیف‌سنج انرژی نشـان داد که ذرات تیره حاوی ۸٤ درصـد وزنی تیتانیم، ۱۱ درصـد وزنی کربن و حدود ۳ درصـد مولیبدن است. در صد سایر عناصر نیز کم‌تر از یک در صد است. ازاین‌رو می‌توان نتیجه گرفت که ذرات تیرهٔ فاز کاربید تیتانیم اسـت که در فولاد ۳۲۱ با افزودن تیتانیم به ترکیب فولاد برای پایداری کربن و جلوگیری از خوردگی مرزدانه‌ها تشکیل می‌شوند.



شکل ۵ (الف) تصویر میکروسکوپی نوری فصل مشترک جوش الکترود ۳۰۸ و ناحیهٔ متأثر از حرارت، (ب) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی ناحیهٔ متأثر از حرارت فولاد X٦٥ در پاس نهایی، (ج) تشکیل لایهٔ واسط در فصل مشترک فلز جوش و ناحیهٔ متأثر از حرارت در اثر بازگرمایش و تغییرات درصد وزنی عناصر آلیاژی در عرض این لایه، (د) حضور ذرات کاربید تیتانیم و تشکیل فاز دلتا در ناحیهٔ متأثر از حرارت فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱

الکترود ۳۰۹. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی ناحیهٔ متأثر از حرارت فولاد X٦٥ جوش‌کاری شده با الکترود ۳۰۹ در شکل (٦- الف) و (٦- ب) نشان داده شده‌است. مرز ذوب عاری از هر گونه عیب جوش‌کاری مانند حفره و ترک می‌باشد. به‌علاوه، دو لایهٔ متفاوت در فصل‌مشترک فلز جوش الکترود ۳۰۹ و فلز پایه فولاد X٦٥ تشکیل شده‌است. لایهٔ اول دارای فازی با شکل تیغه‌ای است که ضخامت آن در حدود ۳ میکرومتر است و در تماس با فولاد X٦٥ می‌باشد. لایهٔ دوم نیز با ضخامت تقریبی ۳ میکرومتر در تماس با فلز جوش است و توسط یک مرز سیاه‌رنگ از آن جدا شده‌است. به‌منظور شناسایی دقیق‌تر فازهای موجود در لایه‌های واسط، منحنی توزیع خطی عناصر آلیاژی که توسط آنالیز EDS اندازه‌گیری شده‌است، در شکل (٦- ب) نشان داده شده‌است. ملاحظه می‌شود که درصد عناصر آهن، کرم و نیکل در این دو لایه با یکدیگر متفاوت است. مقدار ترکیب شیمیایی نیمه‌کمی این نواحی در جدول (٦) ارائه شده‌است.

با محاسبهٔ مقدار کرم معادل و نیکل معادل در این دو لایه و مراجعه به نمودار شافلر مشخص شد که لایهٔ اول با مورفولوژی تیغه‌ای حاوی فاز مارتنزیت و لایهٔ دوم نیز حاوی ترکیبی از فازهای آستنیت، مارتنزیت و فریت است. این نتایج نشان داد که در هنگام جوش‌کاری فولاد X٦٥ با هر دو الکترود ۳۰۸ و ۳۰۹، لایهٔ حاوی فاز مارتنزیت در فصل‌مشترک فولاد X٦٥ و فلز جوش تشکیل می‌شود. فصل‌مشترک فلز جوش الکترود ۳۰۹ با فولاد ۳۲۱ مشابه الکترود ۳۰۸ است و همان‌گونه که در شکل (٦- ج) نشان داده شده‌است، دانه‌های آستنیت به‌صورت هم‌بافته در فصل‌مشترک رشد کرده‌اند. هم‌چنین، شکل (٦- د) نشان‌دهندهٔ حضور ذرات کاربید تیتانیم با مورفولوژی مکعبی و فاز دلتا فریت در ناحیهٔ متأثر از حرارت است.



شکل ٦ (الف) و (ب) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی فصل مشترک فلز جوش الکترود ۳۰۹ و فولاد X٦٥ در بزرگ‌نمایی‌های مختلف به‌همراه توزیع خطی عناصر آلیاژی در عرض این لایه، (ج) تصویر میکروسکوپی نوری فصل مشترک فلز جوش و فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱، (د) حضور ذرات کاربید تیتانیم و دلتا فریت در ناحیهٔ متأثر از حرارت فولاد زنگ‌نزن ۳۲۱

جدول ٦ ترکیب شیمیایی فازهای نشان‌داده‌شده در شکل (٦)

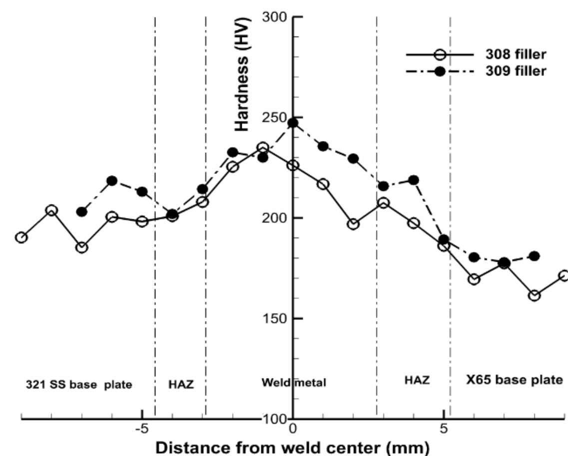
ترکیب شیمیایی	Fe	Cr	Ni	Si	Mn	Ti	Mo
فولاد X٦٥	مابقی	۰/۱	۰/۱	۰/۳	۱/۲	۰/۱	۰/۱
فلز جوش	مابقی	۱۹/٦	۹/٤	۰/۹	۰/۰	۰/۱	۰/۱
لایهٔ اول (فاز تیغه‌ای)	مابقی	۱۰/۵	۳/٤	۰/۵	۰/٤	۰/۱	۰/۲
لایهٔ دوم	مابقی	۱۷/۲	۷/۰	۰/۸	۰/۰	۰/۱	۰/۱

خواص مکانیکی

سختی

شکل (۷) منحنی تغییرات سختی در عرض جوش الکترودهای ۳۰۸ و ۳۰۹ را نشان می‌دهد. مقدار سختی فلز جوش دو الکترود ۳۰۸ و ۳۰۹ به‌ترتیب ۳۰ درصد و ۳۸ درصد بیشتر از فولاد کم‌آلیاژ است. علاوه‌بر این، مقدار میانگین سختی فلز جوش حاصل از الکترود ۳۰۹ اندکی بالاتر از الکترود ۳۰۸ می‌باشد.

یکی از دلایل بالاتر بودن سختی، درصد بالاتر فاز دلتا فریت در ریزساختار فلز جوش حاصل از این الکترود است که سبب افزایش فصل مشترک دو فاز فریت و آستنیت و افزایش سختی شده‌است. بالاتر بودن درصد عناصر آلیاژی در ترکیب فلز جوش حاصل از الکترود ۳۰۹ نیز یکی دیگر از عوامل سختی بالاتر فلز جوش است. زیرا حضور عناصر در ترکیب فازهای آستنیت و فریت سبب افزایش استحکام و سختی این فازها با مکانیزم محلول جامد می‌شود.



شکل ۷ منحنی تغییرات سختی برحسب فاصله در عرض جوش الکترودهای ۳۰۸ و ۳۰۹

خواص کششی

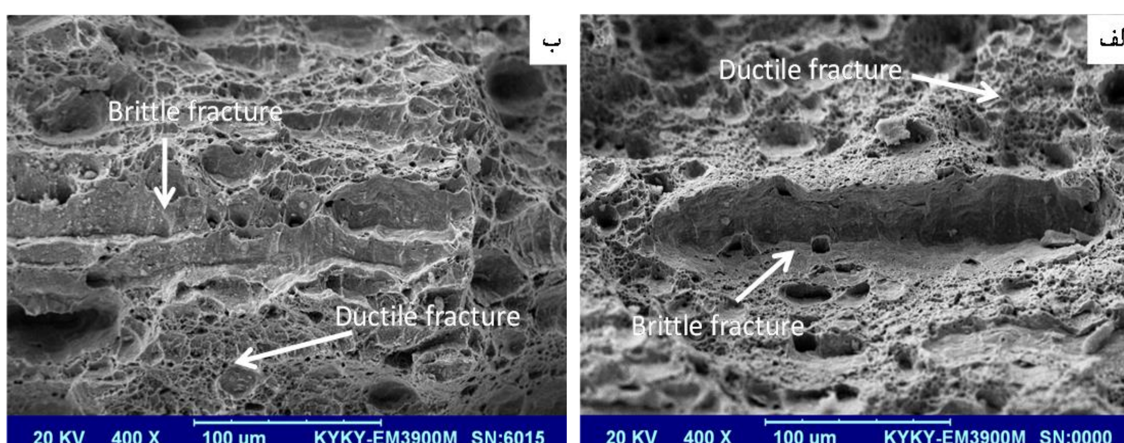
به‌منظور بررسی استحکام کششی اتصال غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۲۱ به فولاد X۶۵ که بااستفاده از الکترودهای ۳۰۸ و ۳۰۹ جوش‌کاری شده‌اند، آزمون کشش انجام شد. اطلاعات حاصل از این آزمون به‌همراه خواص مکانیکی فلزات پایه و فلز جوش خالص در جدول (۷) ارائه شده‌است.

مقدار میانگین استحکام کششی جوش الکترود ۳۰۹ بالاتر از جوش الکترود ۳۰۸ است. اما، قابلیت تغییر طول در جوش الکترود ۳۰۸ بیشتر است. بالاتر بودن استحکام کششی برای الکترود ۳۰۹ به‌دلیل درصد بالاتر فاز فریت و درنتیجه بیشتر بودن فصل‌مشترک فریت- آستنیت است. به عبارت دیگر، افزایش فصل مشترک‌ها تعداد موانع در مقابل حرکت نابه جایی ها را افزایش داده و منجر به افزایش استحکام فلز جوش شده‌است. از سوی دیگر، بالاتر بودن درصد عناصر آلیاژی محلول در ترکیب فازهای آستنیت و فریت در اتصال الکترود ۳۰۹ می‌تواند سبب بهبود استحکام اتصال با مکانیسم محلول جامد شود. حضور این عوامل سبب شده‌است تا استحکام کششی فلز جوش با دو مکانیزم استحکام‌دهی محلول جامد و استحکام‌دهی مرز دانه‌ای افزایش یابد؛ اما باید توجه داشت که حضور فاز دلتا فریت در ریزساختار سبب کاهش چقرمگی جوش می‌شود [6]. ازاین‌رو، بالاتر بودن درصد فاز فریت در فلز جوش الکترود ۳۰۹ سبب کاهش قابلیت تغییر طول آن شده‌است.

تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی سطح شکست نمونه‌های آزمون کشش برای هر دو الکترود ۳۰۸ و ۳۰۹ به‌ترتیب در شکل‌های (۸- الف) و (۸- ب) نشان داده شده‌است. ملاحظه می‌شود که علاوه‌بر حضور حفرات (Dimple) در سطح شکست که نشان‌دهندهٔ مکانیزم شکست نرم و داکتیل است، سطوح صاف نیز در برخی از نواحی تشکیل شده‌اند. این نواحی بیانگر مکانیزم شکست ترد است و می‌تواند به‌دلیل رشد ترک‌ها درراستای فصل‌مشترک حاوی فاز مارتنزیت ایجاد شده باشد. البته شایان‌ذکر است که فصل‌مشترک فریت و آستنیت در فلز جوش نیز جزو نواحی مستعد به رشد ترک مطرح می‌باشد؛ اما، ازآن‌جاکه شکست در هر دو اتصال در فصل مشترک فلز جوش و فولاد X۶۵ اتفاق افتاده‌است، ازاین‌رو به احتمال زیاد مکانیزم شکست ترد به‌دلیل حضور لایهٔ واسط حاوی فاز مارتنزیت صورت گرفته‌است.

جدول ۷ خواص مکانیکی فلزات پایه و اتصالات جوش‌کاری‌شده با الکترودهای ۳۰۸ و ۳۰۹

	خواص مکانیکی		
	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام کششی (MPa)	قابلیت تغییر طول (درصد)
فولاد ۳۲۱	۲۰۵<	۵۱۵<	۴۰<
فولاد X۶۵	۴۴۸<	۵۳۰<	۱۸
الکترود ۳۰۸H (سازنده)	۴۳۰	۶۰۰	۴۵
الکترود ۳۰۹L (سازنده)	۴۷۰	۵۸۰	۳۵
جوش الکترود ۳۰۸	---	۱۰±۵۵۳	۲۵/۰±۵/۳
جوش الکترود ۳۰۹	---	۲۱±۵۶۲	۱۸/۰±۷/۴



شکل ۸ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی سطح شکست نمونه‌های آزمون کشش برای (الف) الکترود ۳۰۸ و (ب) الکترود ۳۰۹

نتیجه‌گیری

در این پژوهش اتصال غیرهم‌جنس فولاد کم‌آلیاژ استحکام بالای X۶۵ به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۲۱ بااستفاده از فرایند جوش‌کاری قوسی دستی با دو الکترود ۳۰۸ و ۳۰۹ انجام شد. سپس ساختار، ریزساختار، سختی و خواص کششی اتصالات مورد بررسی قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده را می‌توان به‌صورت زیر مطرح کرد:

۱. ساختار هر دو اتصال در ناحیهٔ جوش حاوی فازهای آستنیت و دلتا فریت بود. بررسی‌های ریزساختاری نشان داد که درصد فاز فریت در جوش الکترود ۳۰۹ بالاتر (۱۳/۵ درصد حجمی) از مقدار این فاز در جوش الکترود ۳۰۸ (۶/۵ درصد حجمی) بود. هم‌چنین در هر دو اتصال یک لایهٔ واسط حاوی فازهای فریت و مارتنزیت در فصل‌مشترک فلز جوش و فولاد کم‌آلیاژ استحکام بالای X۶۵ تشکیل شد.

۲. مقدار سختی فلز جوش دو الکترود ۳۰۸ و ۳۰۹ به‌ترتیب ۳۰ درصد و ۳۸ درصد بیشتر از فولاد کم‌آلیاژ بود. نتایج آزمون کشش بیانگر آن بود که استحکام کششی جوش تولید شده با الکترود ۳۰۹ در حدود ۱/۵ درصد بالاتر از الکترود ۳۰۸ و مقدار قابلیت تغییر طول ۲۶ درصد کم‌تر بود. باتوجه به این نتایج می‌توان از هر دو الکترود برای اتصال غیرهم‌جنس فولادهای مذکور استفاده کرد؛ اما الکترود ۳۰۸ به‌علت درصد بالاتر قابلیت تغییر طول و استحکام مشابه با الکترود ۳۰۹ گزینهٔ بهتری خواهد بود.

۳. شکست نهایی در تمامی نمونه‌ها در فصل‌مشترک فلز جوش و فولاد کم‌آلیاژ اتفاق افتاد. بررسی سطوح شکست نمونه‌ها بیانگر نوع شکست نرم و ترد در تمامی نمونه‌ها بود.

تقدیر و تشکر

این پژوهش از حمایت مالی شرکت گاز استان سیستان و بلوچستان برخوردار بوده است و نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند تا از این شرکت برای تهیهٔ فولاد X65 و حمایت مالی صورت‌گرفته تشکر کنند.

مراجع

۱. ناظم الرعایا، علیرضا، و فاضل نجف‌آبادی، محمود، "بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال فولاد API-X65 به‌روش جوش‌کاری هم‌زن اصطکاکی"، *فرآیندهای نوین در مهندسی مواد*، شماره ۹، صفحه ۷۵–۸٤ (۲۰۱۷).

۲. حیدری، معصومه، "اثر حرارت ورودی بر خواص مکانیکی و شکست جوش GMAW فولاد خط لوله در حضور هیدروژن"، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد مهندسی مواد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه تربیت مدرس، (۱۳۹۵).

3. Sayyar, N., Shamanian, M. and Niroumand, B., "Arc Weldability of Incoloy 825 to AISI 321 Stainless Steel Welds", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 262, pp. 562-570, (2018).
4. Kumar, P. and Sinha, A.N., "Effect of Pulse Width in Pulsed Nd:YAG Dissimilar Laser Welding of Austenitic Stainless Steel (304 L) and Carbon Steel (st37)", *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, Vol. 5, pp. 317-334, (2018).
5. Poorkabirian, M., Mostaan, H. and Rafiei, M., "The Effect of Filler Metal on Properties of AISI 4130 to AISI 316L Dissimilar Joint", *Journal of Advanced Materials In Engineering*, Vol. 36, pp. 33-46, (2017).
6. Pouraliakbar, H., Hamedi, M., Kokabi, A.H. and Nazari, A., "Designing of CK45 Carbon Steel and AISI 304 Stainless Steel Dissimilar Welds", *Materials Research*, Vol. 17, pp. 106-114, (2014).
7. Shojaati, M. and Beidokhti, B., "Characterization of AISI 304/AISI 409 Stainless Steel Joints Using Different Filler Materials", *Construction and Building Materials*, Vol. 147, pp. 608-615, (2017).
۸. شفیعیان، جواد، صائب نوری، احسان، و جعفرزادگان، مصطفی، "بررسی ارتباط ریزساختار و مقاومت به خوردگی جوش غیرهم‌جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۰٤ و فولاد سادهٔ کربنی st37 به‌روش جوش‌کاری اغتشاشی اصطکاکی"، *فصل‌نامهٔ علوم و مهندسی خوردگی*، شماره ۸ صفحه ۷-۲۰، (۱۳۹۳).
۹. مصطفائی، محمد علی، سرکاری خرمی، محمود، پور علی اکبر، حسام، و کوکبی، امیرحسین، "بررسی ریز ساختار و خواص مکانیکی اتصال غیرهم‌جنس فولاد زنگ‌نزن فریتی به فولاد سادهٔ کم کربن"، چهارمین همایش مشترک انجمن مهندسان متالورژی و جامعه علمی ریخته‌گری ایران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، (۱۳۸۹).
10. Gou, N.N., Zhang, J.X., Zhang, L.J., Li, Z.G. and Bi, Z.Y., "Single Pass Fiber Laser Butt Welding of Explosively Welded 2205/X65 Bimetallic Sheets and Study on the Properties of the Welded Joint", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 86, pp. 2539-2549, (2016).
11. Zhang, L., Pei, Q., Zhang, J.X., Bi, Z.Y. and Li, P.C., "Study on the Microstructure and Mechanical Properties of Explosive Welded 2205/X65 Bimetallic Sheet", *Materials and Design*, Vol. 64, Article 462476, (2014).
12. Gou, N.N., Zhang, L.J. and Zhang, J.X., "Increased Quality and Welding Efficiency of Laser Butt Welding of 2205/X65 Bimetallic Sheets with a Lagging MIG Arc", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 251, pp. 83-92, (2018).
13. Sayiram, G. and Arivazhagan, N., "Microstructural Characterization of Dissimilar Welds between Incoloy 800H and 321 Austenitic Stainless Steel", *Materials Characterization*, Vol.102, pp. 180-188, (2015).
14. Sharma, S., Taiwade, R.V. and Vashishtha, H., "Investigation on the Multi-Pass Gas Tungstenarc Welded Bi-Metallic Combination between Nickel-Based Superalloy and Ti-Stabilized Austenitic Stainless Steel", *Journal of Materials Research*, Vol. 32, pp. 3055-3065, (2017).
15. www.yazd-electrode.com, (Acsessed 2021).
16. Folkhard, E., "Welding Metallurgy of Austenitic Stainless Steels", Springer., Vienna, pp. 197-222, (1988).
17. Feng, Y., Luo, Z., Liu, Z., Li, Y., Luo, Y. and Huang, Y., "Keyhole Gas Tungsten arc Welding of AISI 316L Stainless Steel", *Materials & Design*, Vol. 85, pp. 24-31, (2015).